

## IEEE 802.11.p WAVE를 위한 기하학적 채널 모델: 경로 감쇠를 고려한 모델 확장

유상조, 김기선

광주과학기술원

{asapyoo, kskim}@gist.ac.kr

## A Geometry-Based Stochastic Channel Models for IEEE 802.11.p WAVE: Extension to Path-Loss

Sangjo Yoo, Kiseon Kim

Gwangju Institute of Science and Technology

## 요약

차량 간 (vehicle-to-vehicle, V2V) 통신 채널은 송수신 차량들의 높은 이동성으로 인한 급격한 시변 특성을 나타내며, 전송된 신호는 도로변 산란자 (roadside scatterer, RSS)에 의한 최대 도플러 확산을 겪게 되어 통신 시스템의 신뢰성을 저하시킨다. 본 논문에서는 경로 감쇠를 고려한 RSS모델을 제안하고, 해당 모델의 DPSD를 해석가능한 단일 적분 형태로 유도하였다. 경로 감쇠를 고려한 RSS모델의 유효성을 검증하기 위해, IEEE 802.11p 표준 채널 모델의 측정 데이터와 비교 하였으며, 그 결과 이론적인 DPSD가 측정 데이터와 그 형태 및 통계적 특성이 매우 유사함을 보였다. 이는 RSS가 V2V 채널의 시변특성에 매우 중요한 역할을 함을 시사한다. 본 연구결과는 V2V채널의 통계특성 분석 및 페이딩 시뮬레이터 제작에 활용될 수 있다.

## I. 서론

IEEE 802.11.p WAVE 규격 기반의 차량 간 (vehicular-to-vehicular, V2V) 통신은 차량 안전과 직결된 응용분야에 사용되므로, 통신 링크의 신뢰성 확보가 무엇보다 중요하다. 급격한 이동성을 가진 V2V 채널 환경에서 IEEE 802.11.p 규격 모델의 신뢰성 및 성능 테스트를 위해서는, V2V 페이딩 채널의 시변 특성에 의한 도플러 스펙트럼 (Doppler power spectral density, DPSD) 분석과 이를 기반으로 한 현실적인 채널 모델링 기술, 측정 데이터 기반의 페이딩 시뮬레이터 제작 기술들이 필수적이다.

[1]의 V2V 채널 측정연구 결과에 따르면 수신신호는 주로 1) 가시선 성분; 2) 도로 표지판 또는 주변 차량과 같은 이산 산란자 성분; 3) 가로수, 빌딩과 같은 정적인 도로변 산란자 (roadside scatterer, RSS) 성분으로 이루어져 있으며, 특히 RSS는 이산 산란자 성분에 비해 더 큰 도플러 확산을 일으키는 주요 원인으로 밝혀졌다. 이러한 RSS 성분의 모델링을 위해 [2]에서는 기하학 기반 이차원 RSS 모델을 제안하였으나, 해당 모델의 이론적인 DPSD의 분석은 이루어지지 않았다. 따라서 RSS에 의한 채널의 도플러 확산 정도를 알 수 없을 뿐만 아니라, 실제 측정된 DPSD와 모델의 DPSD간의 정량적인 비교가 불가능하여, 실측기반 채널 시뮬레이터의 설계가 어려웠다.

이러한 단점을 극복하기 위해, [2]에서는 일반화된 이차원 RSS 모델을 제안하고, 모델의 DPSD와 도플러 주파수 확률밀도함수 (probability density function, PDF)의 등가성을 이용하여 수치해석 가능한 단일 적분 형태의 해를 제안하였다. 그러나 그 결과는 RSS에 의한 모든 다중경로 성분의 경로감쇠가 총 전파거리에 관계없이 동일하다 (equal path gain, EPG)는 가정 하에 분석이 이루어져 물리적인 측면에서 현실적이지 않다.

본 논문에서는 [2]의 모델에 전파감쇠 모델을 추가한 확장된 이차원 RSS 모델을 제안하고, 수치해석 가능한 단일 적분 형태의 DPSD를 유도한다. 제안된 모델의 유효성을 검증하기 위해, 모델의 DPSD와 [3]에서 제안된 IEEE 802.11.p 표준 채널의 측정된 DPSD를 비교 및 분석하여 제안

된 모델의 유효성을 보이고, RSS가 V2V 채널의 시변특성에 미치는 영향을 분석한다.

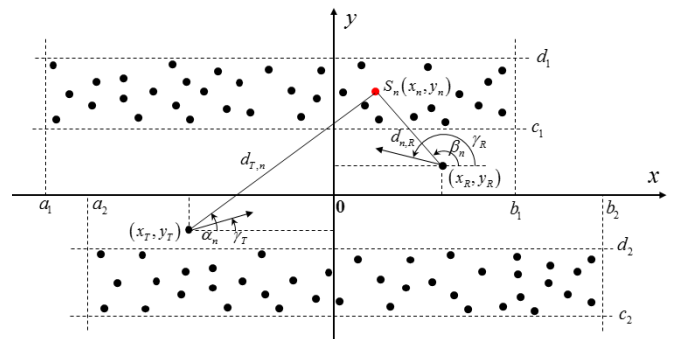


그림 1. 기하학적 도로변 산란자 모델.

## II. 경로 감쇠를 고려한 이차원 도로변 산란자 채널 모델

본 논문에서 고려하는 모델은 그림 1과 같고, 기본적인 모델의 파라미터 정의는 [2]와 동일하나, 시변 채널이득 모델은 경로 감쇠를 고려할 수 있도록 일반화 되었다. 그림 1에서, 송신기 (Tx)와 수신기 (Rx)는  $(x_T, y_T)$  및  $(x_R, y_R)$ 에 위치하며,  $x$ 축을 기준으로 각각  $\gamma_T, \gamma_R$ 의 방향과  $v_T$  및  $v_R$ 의 속도로 이동한다.  $x$ 축은 도로의 중앙선을 나타내고, 도로의 양측 비대칭 사각형 영역에  $N$ 개의 RSS들이 균등 분포하고 있음을 가정한다.  $n$ 번째 RSS는  $S_n$ 로 표기하며, 그 위치는  $(x_n, y_n)$  ( $n=1, 2, \dots, N$ )으로 정의한다. 이때,  $S_n$ 에 의해 산란된 신호의 발산각과 수신각은 각각  $\alpha_n$ 와  $\beta_n$ 로 정의된다. 상기 RSS 분포에 대한 가정으로부터,  $S_n$ 의 위치는 한 쌍의 랜덤 변수  $(X_n, Y_n)$ 로 모델링 될 수 있으며,  $S_n$ 에 의한  $(\alpha_n, \beta_n)$  또한 한 쌍의 랜덤 변수  $(A_n, B_n)$ 로 모델링 될 수 있다.  $(X_n, Y_n)$ 와  $(A_n, B_n)$ 의 결합 PDF (joint PDF, JPDF)는 논문 [2]에

서와 같이 정의된다. 한편,  $S_n$ 에 의해 발생하는 전체 도플러 주파수는

$$F_{D,n} = (v_T \cos(A_n - \gamma_T) + v_R \cos(B_n - \gamma_R)) / \lambda \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있으며,  $\lambda$ 는 파장 길이이다. 이때, RSS모델의 시변 채널 이득은 다음과 같은 복소 지수 함수의 무한 합으로 모델링 될 수 있다:

$$h(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N\sigma_{hh}^2}} \sum_{n=1}^N d_n^{-\frac{\Gamma}{2}} e^{j(\Theta_n + 2\pi F_{D,n}t)} \quad (2)$$

이 때,  $d_n = d_{T,n} + d_{R,n}$ 은  $S_n$ 에 의한 전체 전파 거리,  $\Gamma$ 는 경로 감쇠 지수,  $\Theta_n \sim U(-\pi, \pi)$ 은 i.i.d. 랜덤 위상,  $\sigma_{hh}^2 = E[h^2(t)]$ 이다.

### III. 경로 감쇠를 고려한 도플러 PSD 분석

식 (2)의 자기상관함수  $R_{hh}(\tau)$ 은 다음과 같이 정의된다:

$$\begin{aligned} R_{hh}(\tau) &= E[h^*(t)h(t+\tau)] \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N\sigma_{hh}^2} \sum_{n=1}^N E[d_n^{-\Gamma} e^{j2\pi F_{D,n}\tau}] \\ &= \sigma_{hh}^{-2} \int \int d^{-\Gamma}(x,y) e^{j2\pi F_D(x,y)\tau} f_{XY}(x,y) dx dy \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $f_{XY}(x,y)$ 는  $(X_n, Y_n)$ 의 JPDF이다. 식 (3)의 DPSD,  $S_{hh}(\nu)$ 는 식(3)를 푸리에 변환함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다:

$$S_{hh}(\nu) = \sigma_{hh}^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} \int \int d^{-\Gamma}(x,y) e^{j2\pi(F_D(x,y)-\nu)\tau} f_{XY}(x,y) dx dy d\tau \quad (4)$$

(4)의 수식은 정확한 수치해석이 불가능하나, [2]의 식 (5)에 주어진 joint Doppler-AoA PDF를 이용하면, 식 (4)를 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned} S(\nu) &= \sigma_{hh}^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} \int \int d^{-\Gamma}(f,\beta) e^{j2\pi(f-\nu)\tau} f_{F_D,B}(f,\beta) df d\beta d\tau \\ &= \sigma_{hh}^{-2} \int_{\beta} d^{-\Gamma}(\nu,\beta) f_{F_D,B}(\nu,\beta) d\beta \end{aligned} \quad (5)$$

### IV. 수치해석 결과

그림 2와 3에서, 경로감쇠를 고려한 RSS 모델의 유효성을 검증하기 위해, 식 (5)과 논문 [3]의 측정된 DPSD를 비교하였다. 비교에 사용된 데이터 셋은 "M2M-Expressway Same Direction with Wall, 300-400m"이며, 해당 데이터는 고속도로에서 송수신 차량이 같은 방향 및 104km/h의 속도로 이동하는 경우에 측정되었다.

그림2에서는 경로감쇠지수  $\Gamma$ 에 따른 두 DPSD의 통계적 적합성 (goodness-of-fit)을 분석하였으며, 이를 위해 root-mean-square Doppler spread (RDS) ([4]의 수식 (3.28) 참조)의 절대 값 오차를  $\Gamma$ 에 대해 분석하였다. 이 때,  $\Gamma=0$ 는 EPG가정을 했을 때의 경우이며,  $\Gamma=2$ 는 자유공간 손실의 경우이다. 따라서,  $\Gamma \in (0,2)$  구간에서의 오차 결과는 분석에서 제외하였다. 분석을 위해 사용된 모델 파라미터는 다음과 같다:  $f_c = 5.9GHz$ ,  $x_T = -200, x_R = 200, y_T = y_R = -8.75$ ,  $a_i = -300, b_i = 300, c_1 = 18, d_1 = 25, c_2 = -d_1, d_2 = -c_1$  (단위: m),  $v_T = v_R = 104km/h, \gamma_T = \gamma_R = 0$ . 분석 결과,  $\Gamma=0$ 일 때 RDS 최대오차를 보였으며,  $\Gamma=5.6$ 에서는 0.96Hz로 최소 오차를 보였다. 이는 본 논문에서 제안된 모델이 [3]에서 제안된 EPG가정 기반의 모델보다 통계적으로 더 정확하게 측정데이터를 모사할 수 있음을 시사한다.

그림3은 제안된 모델의 DPSD와 측정된 DPSD의 비교 결과이다. 모델 파라미터는 그림2의 경우와 같고, 경로감쇠지수는 RDS 최소오차를 가지는  $\Gamma=5.6$ 을 선택하였다. 비교 결과는 경로감쇠를 고려한 제안된 모델이 고속도로에서 측정된 DPSD값과 매우 유사함을 나타내었으며, 이는 제안된 모델의 유효성을 입증한다. 또한, 해당 결과는 RSS가 고속도로 V2V

채널의 시변특성에 매우 중요한 역할을 함을 의미한다.

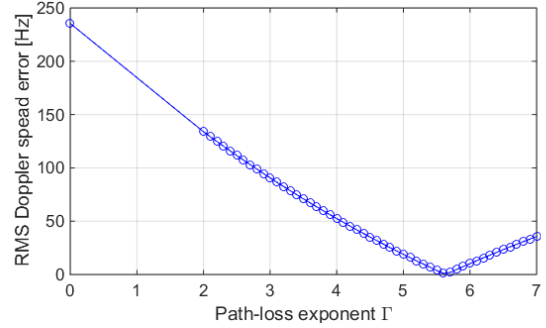


그림 2. 경로감쇠지수  $\Gamma$ 에 따른 RDS 오차

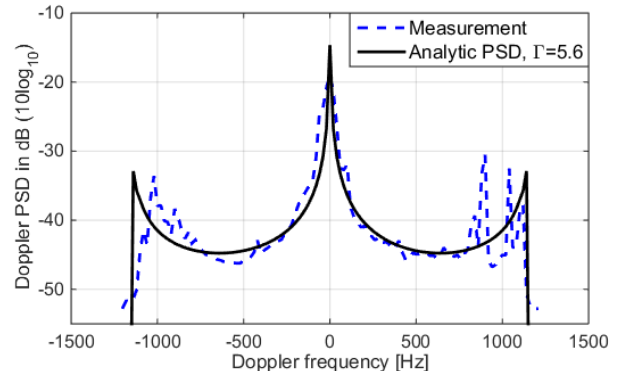


그림 3. 제안된 DPSD와 측정된 DPSD [3]의 비교

### V. 결론

본 논문에서는 경로감쇠를 고려한 RSS 채널 모델을 제안하고, 제안된 모델의 DPSD를 수치해석이 가능한 단일 적분형태로 유도하였다. 제안된 모델의 검증을 위해 [3]의 IEEE 802.11.p 표준 채널 모델의 측정 데이터와 비교를 수행하였다. 그 결과, 제안된 모델의 DPSD는 측정 데이터와의 형태 및 통계적 특성이 매우 유사하였으며, 경로 감쇠를 고려한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 통계적 유사도가 더 높았다. RSS 모델과 측정 데이터 사이의 높은 유사성은 RSS가 V2V채널에서의 수신 신호 전력에 큰 기여를 하는 것으로 해석 가능하다. 본 연구 결과는 V2V채널의 통계특성 분석 및 페이딩 시뮬레이터 제작에 활용될 수 있다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 광주과학기술원 전자전통화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] J. Karedal 외 7명, "A geometry-based stochastic MIMO model for vehicle-to-vehicle communications," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 8, no. 7, pp. 3646 - 3657, Jul. 2009.
- [2] 유상조, 외 4명, "차량 간 통신 환경을 위한 도로변 산란자 채널 모델의 도플러 스펙트럼 분석: 고속도로환경에서 상호 접근 주행하는 경우의 사례 연구," KICS 동계종합학술발표회 논문집, 2017. 1. pp. 720-721.
- [3] Acosta-Marum, "Measurement, modeling, and OFDM synchronization for the wideband mobile-to-mobile channel," Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, May 2007.
- [4] M. Pätzold, Mobile Radio Channels, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2011.